

岩石物理相分类与致密储层含气层评价

——以苏里格气田东区致密储层老井复查为例

成志刚¹, 宋子齐^{2*}, 何羽飞¹, 庞玉东², 田新², 张景皓³

(1.中国石油测井有限公司 油气评价中心, 陕西 西安 710077; 2.西安石油大学 石油工程学院, 陕西 西安 710065; 3.西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要:针对苏里格气田东区致密储层受多期不同类型沉积、成岩作用及构造等因素影响, 储集空间小、非均质性强、储层孔隙类型结构和测井响应复杂等问题, 开展该区致密储层岩石物理相研究, 在此基础上确定含气层下限与评价标准。研究区可划分出石英支撑强溶蚀粒间孔、溶孔型, 岩屑石英砂岩溶孔型和杂基微孔致密型3类岩石物理相, 并建立了致密储层岩石物理相评价划分标准。利用不同岩石物理相物性分析、试气、测井及气测全烃资料, 建立了该区致密储层不同岩石物理相含气层类别下限与评价标准。不同岩石物理相含气层残余气饱和度及其差异小, 而剩余可动气饱和度及其差异相对较大, 相应的测井响应参数变化较大。利用所建立的含气层下限和评价标准, 对目的层进行细分层段的精细对比与评价, 对研究区46口井目的层段致密储层进行复查和重新评价, 新增不同类别岩石物理相含气层335个, 新增含气层厚度为1 095.4 m, 其中新增I类岩石物理相气层81个, 新增有效厚度为294 m。

关键词:岩石物理相分类 致密储层 泥浆侵入带剩余气变化 含气层下限 气层评价 测井解释

中图分类号: TE112.36

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)05-0023-05

苏里格气田东区在上古生界山2段和山1段沉积时期的沉积环境由海相转变为陆相, 为曲流河三角洲平原沉积; 盒8段以发育大型河流—冲积平原沉积体系并大幅向南推进为特征, 盒8段下亚段沉积时期物源丰富, 为辫状河沉积, 晚期随着北部内蒙古陆抬升相对减弱, 沉积物补给及其河流进积作用减弱, 盒8段上亚段沉积时期转为曲流河沉积。由于沉积相带中沉积物分选性差, 成岩作用复杂, 压实和胶结作用强烈, 且储层成岩阶段终止于中成岩B期, 没有达到次生孔隙大规模发育的晚成岩阶段, 导致研究区目的层段——山1段、山2段和盒8段均为强非均质性致密储层^[1-4]。

苏里格气田东区储层微观孔隙类型多样, 结构复杂, 存在多种孔隙、喉道类型, 大部分为细小、无效喉道; 孔喉分选系数、变异系数和均质系数变化范围大, 排驱压力和中值压力偏高, 最大孔喉半径和退汞效率低, 形成以成岩溶孔为主、多孔隙类型共存的复杂孔隙结构, 储层具有明显的非均质性、

非线性分布和测井响应特征复杂的特点^[4-7]。因此, 有必要利用研究区目的层段致密储层的各类测井、岩心和试气资料, 研究储层岩石物理相的多种信息, 建立不同类别岩石物理相含气层评价指标及解释方法。

1 储层岩石物理相分类

储层岩石物理相是控制致密储层“四性”关系和测井响应特征的主导因素^[8-13]。分析研究区储层沉积作用、成岩作用和岩性、物性、孔隙类型、孔隙结构及测井响应特征, 划分出较好型(石英支撑强溶蚀粒间孔、溶孔型)、较差型(岩屑石英砂岩溶孔型)和致密型(杂基微孔致密型)3类岩石物理相类型。

石英支撑强溶蚀粒间孔、溶孔型岩石物理相(I类) 该类储层以中粗粒石英砂岩为主, 含部分岩屑石英砂岩, 碎屑组分中石英含量在90%以上。石

收稿日期: 2013-07-11。

作者简介: 成志刚, 男, 高级工程师, 从事测井方法、解释和新技术研究。联系电话: 18629556879, E-mail: zgcheng_007@126.com。

*通讯作者: 宋子齐, 男, 教授, 从事油气储层、测井解释及剩余油气评价教学和科研工作。联系电话: 13201877500, E-mail: songziqi0827@126.com。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“致密气藏测井采集处理与评价技术研究”(2010E-2304), 国家自然科学基金项目“变形介质复杂储层应力敏感性的岩石流变学机理及动态模型”(51104119)。

英颗粒间呈线—凹凸接触,孔喉分选较好,磨圆度呈次圆状。该类储层处于心滩、边滩浅水河道有利相带中,水浅且水动力条件强,形成的中粗粒石英砂岩在成岩过程中抗压实作用较强,使部分原生粒间孔得以保存,且中粗粒石英砂岩相对于细粒砂岩硅质胶结作用弱,从而使易溶组分发生溶蚀而改善储层。该类储层渗透率一般大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,面孔率大于4.0%,孔隙度大于10%。压汞曲线呈较宽平台型,排驱压力小于0.5 MPa,中值压力小于5.0 MPa,分选系数、变异系数、均质系数居中,最大孔喉半径大于1.0 μm ,中值半径大于0.1 μm ,退汞效率大于40%,孔隙结构综合参数大于20。测井响应主要呈现“六降低两升高”特征,即自然电位、自然伽马、光电吸收截面指数、密度、中子孔隙度和电阻率降低,声波时差升高、井径增大。

岩屑石英砂岩溶孔型岩石物理相(Ⅱ类) 该类储层以中粗粒岩屑石英砂岩为主,岩屑含量相对较低。石英及岩屑颗粒以线接触为主,孔喉分选较好,磨圆度呈次圆—次棱状。该类储层处于心滩、边滩及河道滞留充填砂体有利相带中,储层中石英加大及粒间自生石英发育,成岩压实、石英次生加大及高岭石充填使原生粒间孔隙明显减少。但储层中易溶的岩屑、杂基溶解形成的溶蚀孔隙和发育的蚀变高岭石晶间孔,为该类储层提供了较好的排出扩散条件。该类储层发育溶蚀孔隙和自生高岭石晶间孔,孔喉变细,物性和孔隙结构变差。渗透率为 $0.3 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,面孔率为1.0%~4.0%,孔隙度为7%~10%。压汞曲线呈缓坡型,排驱压力为0.5~1.5 MPa,中值压力为5.0~15.0 MPa,分选系数、变异系数、均质系数相对较低,但分布范围增大,最大孔喉半径为0.5~1.0 μm ,中值半径为0.03~0.1 μm ,退汞效率为35%~45%,孔隙结构综合参数为10~20。相对于Ⅰ类岩石物理相,测井响应主要呈现“六较低两较高”特征,即自然电位、自然伽马、光电吸收截面指数、密度、中子孔隙度和电

阻率较低,声波时差较高、井径微增大。

杂基微孔致密型岩石物理相(Ⅲ类) 该类储层以细、中、粗粒岩屑砂岩为主,包括含泥石英砂岩、塑性岩屑、杂基的各类杂砂岩。该类储层处于河道边缘天然堤、决口扇和分流间湾砂体中,储层泥质含量高,成岩压实和钙质胶结交代作用强烈。该类储层孔隙类型以杂基微孔和零星分布的颗粒溶孔为主,储层物性和孔隙结构差。储层渗透率小于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,面孔率小于1.0%,孔隙度小于7.0%。压汞曲线呈斜坡型,排驱压力大于1.5 MPa,中值压力大于10.0 MPa,分选系数、变异系数、均质系数分布范围大,最大孔喉半径小于0.5 μm ,中值半径小于0.06 μm ,退汞效率小于35%,孔隙结构综合参数小于10。测井响应主要呈现“五升高三降低”的特征,即自然电位、自然伽马、光电吸收截面指数、密度和电阻率升高,声波时差、中子孔隙度和井径降低。

3种不同类别岩石物理相储层具有不同岩性、物性、孔隙结构和测井响应特征^[14-17],为此,利用致密储层岩石物理相分类的测井响应特征,综合流动层带指标(FZI)对不同类别岩石物理相特征进行分析,利用灰色理论^[17-19]对研究区致密储层岩石物理相进行统计,采用统计平均数据列为岩石物理相评价划分指标,以标准指标的绝对差作为评价准确率,用标准离差平方和的方根作为评价分辨率,利用准确率和分辨率组合分析赋予各项评价指标不同的权系数,并根据气田具体地质特征进行系数统计分析、调整和匹配,建立研究区致密储层岩石物理相评价划分标准及权系数(表1)。采用10种测井响应特征性参数和计算的流动层带指标,利用灰色理论综合评价方法,进行被评价井点数据的综合分析处理。采用矩阵分析、标准化、标准指标绝对差的极值加权组合放大技术^[18-20],利用灰色理论集成和综合多种测井信息,确定和划分出研究区目的层段3类岩石物理相。

表1 苏里格气田东区致密气藏储层岩石物理相评价划分标准及权系数

岩石物理相分类	密度减小值/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	自然电位减小系数	伽马钾减小系数	伽马钍减小系数	伽马铀减小系数	自然伽马减小系数	有效光电吸收截面指数减小系数	电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	声波时差减小值/ ($\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	井径减小值/cm	流动层带指标
Ⅰ类	0.164	0.650	0.86	0.92	0.91	0.90	0.69	35.8	-13.52	-10.0	0.781 9
Ⅱ类	0.105	0.445	0.74	0.88	0.88	0.84	0.64	42.2	-2.22	-4.9	0.686 1
Ⅲ类	0.040	0.321	0.66	0.83	0.85	0.80	0.57	51.9	16.88	1.9	0.644
权系数	0.99	0.89	0.93	0.91	0.82	0.86	0.83	0.86	0.96	0.80	0.99

2 储层含气层下限与评价标准

2.1 含气层评价方法

天然气和地层水是储藏在致密气藏储层孔隙空间中的流体矿物,利用测井资料找气,实质上就是寻找饱和在储层岩石孔隙空间的天然气,天然气的密度、声波时差及中子孔隙度与地层的物性差异是识别气层的基本方法^[19-23]。一般在有钻井泥浆液侵入带地层,密度、声波时差、中子孔隙度可探测气层侵入带的剩余气饱和度(S_{gr})变化。泥浆未侵入时残余气饱和度(S_{gr})为气层下限,可动气饱和度(S_{gm})

为气层探测对象;泥浆侵入后残余气饱和度仍为气层下限,可动剩余气饱和度(S_{gma})为气层探测对象。特别是在泥浆液侵入带地层,测井响应不受地层各向异性影响,将测井值与气层下限值和探测对象标准值直接比较,可以有效指示不同类别储层含气层段。

根据密度、声波时差和中子孔隙度测井响应评价含气层准则(表2),密度、声波时差、中子孔隙度分别小于、大于和小于各自含气层下限值或趋于探测标准值,即探测值的剩余气饱和度大于残余气饱和度下限或趋于剩余气饱和度标准,则可直观指示为气层^[22-24]。

表2 密度、声波时差和中子孔隙度测井响应评价含气层准则

测井方法	含气层下限	含气层响应	含气层评价准则
密度	$\rho_c = \phi\rho_w + V_{sh}\rho_{sh} + \sum_{i=1}^n V_{mi}\rho_{mi} - \phi S_{gr}(\rho_w - \rho_g)$	$\rho_b = \phi\rho_w + V_{sh}\rho_{sh} + \sum_{i=1}^n V_{mi}\rho_{mi} - \phi S_{gr}(\rho_w - \rho_g)$	$\rho_b - \rho_c = -\phi(S_{gr} - S_{gr})(\rho_w - \rho_g) < 0$ $S_{gr} > S_{gr}, \rho_b < \rho_c$
声波时差	$\Delta t_c = \phi\Delta t_w + V_{sh}\Delta t_{sh} + \sum_{i=1}^n V_{mi}\Delta t_{mi} - \phi S_{gr}(\Delta t_w - \Delta t_g)$	$\Delta t = \phi\Delta t_w + V_{sh}\Delta t_{sh} + \sum_{i=1}^n V_{mi}\Delta t_{mi} - \phi S_{gr}(\Delta t_w - \Delta t_g)$	$\Delta t - \Delta t_c = -\phi(S_{gr} - S_{gr})(\Delta t_w - \Delta t_g) > 0$ $S_{gr} > S_{gr}, \Delta t > \Delta t_c$
中子孔隙度	$H_c = \phi H_w + V_{sh}H_{sh} + \sum_{i=1}^n V_{mi}H_{mi} - \phi S_{gr}(H_w - H_g) - \Delta H_{gr}$	$H_b = \phi H_w + V_{sh}H_{sh} + \sum_{i=1}^n V_{mi}H_{mi} - \phi S_{gr}(H_w - H_g) - \Delta H_{gr}$	$H_b - H_c = -\phi(S_{gr} - S_{gr})(H_w - H_g) - \Delta H_{gr} < 0$ $S_{gr} > S_{gr}, H_b < H_c$

注: ρ_c 为气层密度下限值, g/cm^3 ; ϕ 为孔隙度; $\rho_w, \rho_g, \rho_{sh}, \rho_m$ 分别为水、气、泥质及骨架密度, g/cm^3 ; V_{sh} 为泥质含量; V_m 为骨架矿物含量; i 为矿物个数; ρ_b 为密度响应值, g/cm^3 ; Δt_c 为气层声波时差下限值, $\mu s/m$; $\Delta t_w, \Delta t_g, \Delta t_{sh}, \Delta t_m$ 分别为水、气、泥质及骨架声波时差, $\mu s/m$; Δt 为声波时差响应值, $\mu s/m$; H_c 为气层含氢指数下限值; H_w, H_g, H_{sh}, H_m 分别为水、气、泥质及骨架含氢指数; H_b 为含氢指数响应值; ΔH_{gr} 为中子“挖掘效应”。

2.2 含气层下限与评价标准

不同类别岩石物理相储层测井响应及其反映出的孔隙度、渗透率、含气饱和度主要取决于组成岩石颗粒、孔隙类型、结构及所含流体性质等, I类岩石物理相岩性以粗粒石英砂岩为主,孔隙类型主要以残余粒间孔和较大次生溶孔组合为主,其储层的孔隙度、渗透率、饱和度及相应测井响应参数标准较高。III类岩石物理相岩性以细、中粒岩屑砂岩为主,孔隙类型以杂基微孔和零星分布的颗粒溶孔为主,其储层的孔隙度、渗透率、饱和度及相应测井响应参数标准低。它们分别反映出不同类别含气层评价下限与标准的差异及特征^[23-25]。因此,必须在岩石物理相分类的基础上建立致密储层含气层下限与评价标准。

采用不同岩石物理相物性分析、试气、测井及气测全烃资料,进行储层含气性、物性和电性关系

分析。利用岩心分析和试气资料确定不同类型含气层孔隙度、渗透率和含气饱和度下限及评价标准;利用测井和试气资料确定不同类型含气层密度、声波时差、中子孔隙度、自然电位减小系数、自然伽马减小系数、钾含量减小系数、钍含量减小系数、铀含量减小系数、光电吸收截面指数减小系数、电阻率及井径减小值下限及评价标准;利用气测全烃、岩心和鉴定资料,确定不同类型含气层全烃和岩性下限及评价标准;并综合含气层和夹层分析方法,确定气层起算下限(0.4 m)和夹层扣除下限(0.2 m)^[23-26]。利用残余气饱和度和剩余可动气饱和度影响的测井响应特征,分别建立了3类岩石物理相不同含气层类别下限与评价标准(表3),其中岩性下限均为中砂岩。

从表3中可以看出,3类岩石物理相不同含气层类别的下限与评价标准都具有相互识别差异,即以

表3 3类岩石物理相不同含气层类别的下限及评价标准

岩石物理相分类	含气层类别	孔隙度, %		渗透率/ 10 ⁻³ μm ²		含气饱和度, %		密度/ (g·cm ⁻³)		声波时差/ (μs·m ⁻¹)		中子孔隙度, %		自然电位 减小系数		自然伽马 减小系数		钾含量 减小系数		铀含量 减小系数		钍含量 减小系数		铯含量 减小系数		光电吸收 截面指数 减小系数		井径减小 值/cm		电阻率/ (Ω·m)		气测 全烃 下限	
		下限	标准	下限	标准	下限	标准	下限	标准	下限	标准	下限	标准	下限	标准	下限	标准	下限	标准	下限	标准	下限	标准	下限	标准	下限	标准	下限	标准	下限	标准		
I类	气层	≥7	10.2	≥0.18	0.73	≥38	50	<2.52	2.476	>225	243	<15	11.8	>0.40	0.627	>0.78	0.87	>0.62	0.776	>0.82	0.891	>0.75	0.881	>0.50	0.649	>-9.955	-1.664	>20	32.4	饱满形			
	气水同层	≥8	10.8	≥0.20	0.43	≥30	35	<2.57	2.525	>216	233	<23	13.6	>0.47	0.69	>0.72	0.859	>0.81	0.877	>0.80	0.886	>0.45	0.62	>-5.316	0.405	>7	36.4	欠饱满漏斗形或钟形					
II类	差气层	≥4	9.5	≥0.10	0.27	≥34	50	<2.55	2.51	>223	235.3	<19	12.7	>0.32	0.589	>0.75	0.891	>0.60	0.72	>0.79	0.877	>0.45	0.643	>-9.026	-0.814	>17	30.3	基本饱满形					
	气显示层	≥2	6.7	≥0.02	0.17	≥30	37	<2.60	2.547	>215	226.3	<17	13.3	>0.27	0.5	>0.69	0.856	>0.82	0.884	>0.71	0.861	>0.51	0.683	>-5.811	-1.389	>19	31	欠饱满齿形					
III类	干层		5.5		0.10		35		2.65		202.1		11.4		0.307		0.776		0.687		0.742		0.833		-0.315		71.9	欠充满					

残余气饱和度参数影响作为含气层下限、以剩余气(含剩余可动气和残余气)饱和度参数影响作为评价含气层标准,可以分别表达不同类别岩石物理相含气层厚度参数变化及其差异。反映残余气饱和度的含气层下限与纯致密干层参数相差不大,下限门槛低,且在参数下限范围内,参数更迭重复范围大;而反映剩余气(含剩余可动气和残余气)饱和度的含气层评价标准与纯致密干层参数相差较大,且不同类型含气层参数相互差异明显。由此可见,致密储层中残余气饱和度小,不同类别岩石物理相含气层残余气饱和度差异也较小,它们在致密储层含气层中测井响应参数变化敏感度低(更迭重复范围大),反映出不同类别含气层下限差异不明显。致密储层中剩余气饱和度相对较大,不同类别岩石物理相含气层剩余气饱和度差异也较大,它们在致密储层含气层中测井响应参数变化相对较大,反映出不同类别含气层评价标准特征差异明显。因此,将3类岩石物理相不同含气层类别下限与评价标准相结合,可以有效地对研究区目的层进行细分层段的精细对比与评价。

3 储层测井精细评价实例

利用致密储层岩石物理相分类后建立的含气层下限和评价标准,对目的层进行细分层段的精细对比与评价,对研究区46口井致密储层目的层段进行复查核实和重新评价认识,新增不同类别岩石物理相含气层335个,新增含气层厚度为1 095.4 m,新增含气层厚度占评价区含气层总厚度的76.2%。其中新增I类岩石物理相气层81个,新增有效厚度为294 m,新增有效厚度占评价区总有效厚度的63.2%。

对召79井盒8段下亚段复查处理43—49层段(图1),其中44,45,47和49层段原解释为气水层和含气水层,复查评价均为I类、II类岩石物理相气层及差气层。对2 809.5~2 812.0 m井段射孔试气,产气量为2.09×10⁴ m³/d。建议该井段重新评价的II类岩石物理相45,47和49号差气层为试气层段。

对召7井盒8段下亚段复查处理46层段,该层段原解释为干层,分段复查评价为I类、II类岩石物理相气层及差气层,对2 901.0~2 906.0 m井段射孔试气,产气量为2.98×10⁴ m³/d,出水量为4.9 m³/d。建议推荐该井段重新评价的II类岩石物理相46-4和46-8号差气层为试气层段。

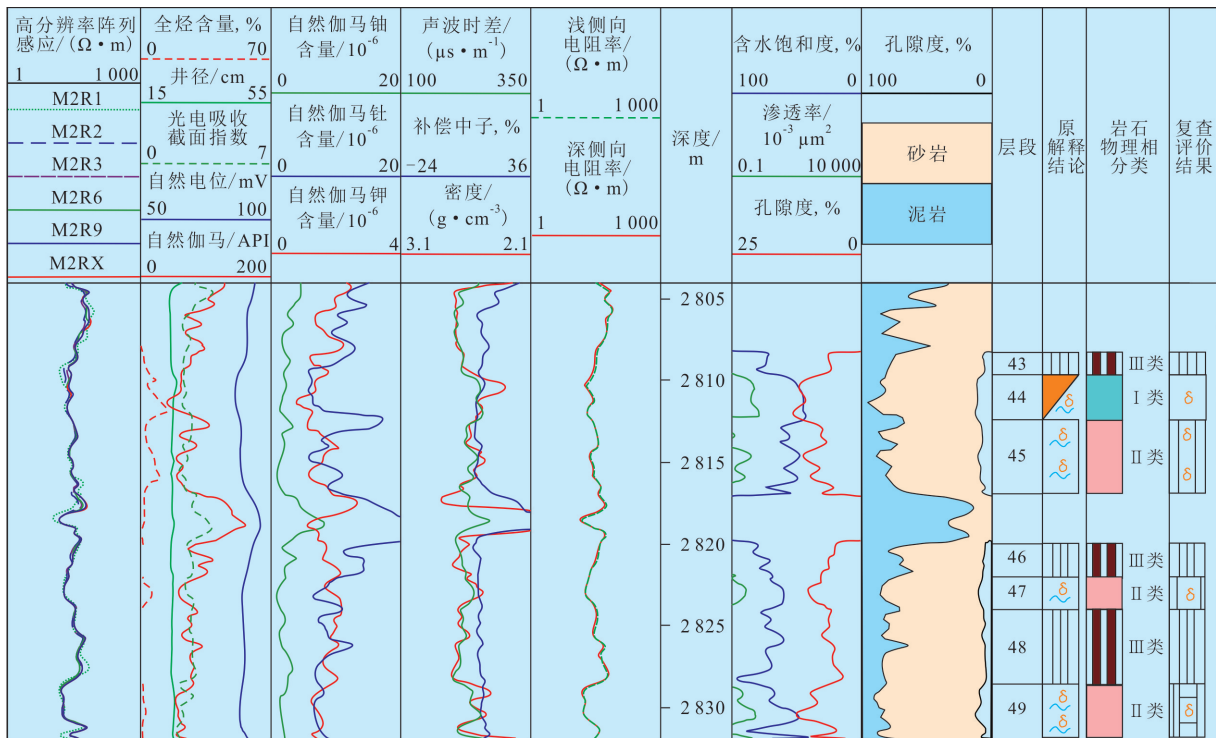


图1 召79井盒8段下亚段致密气藏储层测井精细评价成果

4 结束语

岩石物理相分类主要基于储层的沉积、成岩作用特点和孔隙类型结构特点,同时要考虑多种测井资料的可识别性,利用灰色理论从不同角度对储层岩性、物性、孔隙类型结构和含油气特征进行全面分析,以其测井响应特征及差异提取不同类别岩石物理相的多种信息,集中反映出苏里格气田东区致密储层不同岩石物理相的地质特点。同一种岩石物理相具有相同的沉积、成岩作用和条件,它们具有相似的岩性、物性、孔隙类型结构及测井响应特征,不同岩石物理相储层则难以用统一的解释模型对储层进行表征。

利用不同岩石物理相测井、岩心、试气及气测全烃资料,进行储层含气性、物性和电性关系分析,基于岩石物理相分类建立了研究区致密储层含气层下限与评价标准。通过分别对比分析以残余气饱和度和剩余可动气饱和度参数影响的含气层下限与评价标准的特征,阐明了不同类别岩石物理相含气层评价标准及其下限的差异。从而有效利用不同类型含气层剩余可动气饱和度变化的测井响应建立评价标准,准确表达不同类别岩石物理相含气层厚度参数变化及其差异,为评价划分致密储层及含气层厚度提供了有效方法。

通过研究区致密储层测井精细评价处理,利用实例分析了目的层段致密储层不同岩石物理相气层、差气层的特征和差异,推荐新增气层有效厚度和试气层段,为研究区致密储层增储上产提供了有利目标。

参考文献:

- [1] 杨华,付金华,魏新善.鄂尔多斯盆地天然气成藏特征[J].天然气工业,2005,25(4):5-8.
- [2] 宋子齐,王静,路向伟,等.特低渗透油气藏成岩储集相的定量评价方法[J].油气地质与采收率,2006,13(2):21-23.
- [3] 王学军,王志欣,陈杰,等.鄂尔多斯盆地镇北油田延长组低渗透储层成因及油气运移特征[J].油气地质与采收率,2010,17(1):15-18.
- [4] 宋子齐,白振强,陈荣环,等.陕北斜坡东部特低渗透储层有利沉积相带[J].新疆石油地质,2004,25(6):588-591.
- [5] 蔡玥,赵乐,肖淑萍,等.基于恒速压汞的特低—超低渗透储层孔隙结构特征——以鄂尔多斯盆地富县探区长3油层组为例[J].油气地质与采收率,2013,20(1):32-35.
- [6] 宋子齐,王瑞飞,孙颖,等.基于成岩储集相定量分类模式确定特低渗透相对优质储层[J].沉积学报,2011,29(1):88-95.
- [7] 耿斌,胡心红.孔隙结构研究在低渗透储层有效性评价中的应用[J].断块油气田,2011,18(2):187-190.
- [8] 赵铭海,傅爱兵,关丽,等.罗家地区页岩油气测井评价方法[J].油气地质与采收率,2012,19(6):20-24.
- [9] 宋子齐,杨红刚,孙颖,等.利用岩石物理相分类研究特低渗透储层参数建模[J].断块油气田,2010,17(6):672-677.

(下转第32页)